

VII. MAGYAR FÖLDRAJZI KONFERENCIA KIADVÁNYA

2014 Miskolc

**Kiadó: Miskolci Egyetem
Földrajz – Geoinformatika Intézet**



*Szerkesztette:
Kóródi Tibor
Sansumné Molnár Judit
Siskáné Szilasi Beáta
Dobos Endre*

ISBN 978-963-358-063-9

AZ OJOS DEL SALADO MONITORING VIZSGÁLATA: JÉG- ÉS VÍZJELENLÉT A FÖLD LEGSZÁRAZABB MAGASHEGYSÉGÉBEN

BEVEZETÉS

A Száraz-Andok hegységei mintegy 1500 km hosszan húzódnak a Középső-Andok területén. Itt emelkednek a Föld legszárazabb magas vonulatai, s mivel a hóhatár is itt fut legmagasabban bolygónkon, a 6000 métert meghaladó csúcsmagasságok ellenére a glaciális övezet kiterjedése ma igen kicsiny. Ám a jégmennyiség napjainkban is tapasztalható csökkenése nem csak a felszínt érinti: a hegyi periglaciális övezet is átalakulóban van, mivel a permafroszt jelenléte is zsugorodik. Mindez pedig alapvetően megváltoztatja a kifejezetten száraz, helyenként hiperarid térség vízutánpótlását, felszínfejlődését és környezeti állapotát is.

2012-ben elindított magashegyi környezetváltozás-monitoring vizsgálatunk chilei helyszíne az Ojos del Salado (6893 m) térsége, mivel ez a Föld legmagasabb hóhatárú, jelentős jégborítás nélküli száraz hegye. Így a jég- és vízjelenlétben lejátszódó változások itt követhetők a legnagyobb vertikális kiterjedésben egy érzékeny környezetben. A kutatómunka célja a klímaváltozás okozta átalakulások pontos feltárása a Száraz-Andok legmagasabb részén. E monitoringvizsgálat a terepi adatgyűjtéssel, majd a feldolgozással az extrém helyszín olyan környezeti paramétereiről (elsősorban a hegyi sivatagról, a periglaciális környezetről és a permafrosztról) ad alapinformációkat, amelyek változásai egyben a klímaingadozás dinamizmusának, következményeinek jelzői is.

A jég- és vízjelenlétet elemezve, hosszú távú hőmérsékletméréseket végezve – 2 éves adatsor alapján – már ismerjük a vizsgált helyszínek olvadási és fagyási periódusainak hosszát, dinamikáját, a regolit aktív rétegének évi középhőmérsékleteit, az aktív réteg vastagságviszonyait, a gleccserdegradáció folyamatait. Magyarázni tudjuk a Föld legmagasabban fekvő tavainak keletkezését, mai helyzetét és kilátásait, de a periglaciális tömegmozgások alárendelt szerepének okait is.

¹Nagy Balázs:ELTE Természetföldrajzi Tanszék,

E-mail:nagybalazs@caesar.elte.hu

Mari László:ELTE Természetföldrajzi Tanszék

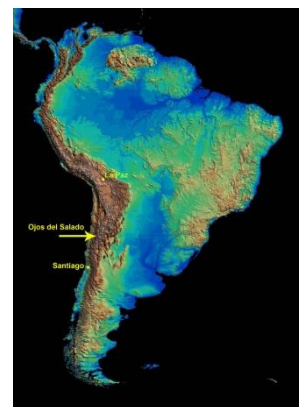
Kovács József:ELTE Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék

Nemerkényi Zsombor:MTA CSFK Földrajztudományi Kutatóintézet

Heiling Zsolt:A Földgömb az Expedíciós Kutatásért Alapítvány

HELYSZÍN

Az Andok legszárazabb része, a Puna de Atacama magasföld és az innen kiemelkedő 6000 méternél magasabb tűzhányók a Föld egyik legextrémebb környezetét alkotják. Itt található bolygónk legmagasabb vulkánja, a 6893 m-es Ojos del Salado (27°06'34.6" D, 68°32'32.1" Ny), amely a chilei-argentín határon hideg és száraz (150 mm/évnél kevesebb csapadék, Messerli et al. 1997) területen jégsapka nélküli hegytömegként tornyosul (1. ábra).



Az 5000 m fölötti területen eső egyáltalán nem jellemző, ám néhány órás havazás nyáron is szinte minden héten várható – a hó gyors, teljes elszublimálásával. A hóviszonyokról, ill. a térség állandó, felszíni jegének előfordulásáról távérzékeléses elemzés készült (Gspurning et al. 2006), azonban az aktuális hóborítás gyakran igen rövid jelenléte miatt mind a csapadékadatok, mind az olvadékvíz-bebecslések bizonytalanok - nem beszélve a jégmaradványok, jégtípusok elkülönítéséről, degradációjának, fogyási folyamatainak meghatározásáról.

Földünkön itt húzódik legmagasabban az éghajlati hóhatár (7000 m körül, Clapperton 1994), itt találunk legmagasabban – időszakos – tavakat (6000-6500 méter között), ez bolygónk legmagasabban húzódó sivataga (kb. 6000 m-es magasságig), amelynek felső részét ugyanakkor hiperarid periglaciális zónának is tekinthetjük. Az Ojos del Salado szunnyadó tűzhányó, fő működési ideje mintegy 30 ezer éve zajlott (Moreno and Gibbons 2007), ma vulkáni kísérelésegek helyszíne. Méréseink adatait a vulkán-jelleg nem befolyásolja, ám ez a hegy, mint vulkáni komplexum emelkedik legmagasabbra és a legextrémebb helyen, a „Száraz-Andok” puna-területén (Karátson et al. 2011).

A térségeddigi egyetlen geomorfológiai felmérése távérzékeléses módszerekkel zajlott (Kaufmann et al. 1995). Ennek oka a szélsőséges időjárási feltételekben, a körülményes megközelíthetőségben, a nehéz terepben is keresendő. Szárazsága és alacsony hőmérséklete miatt földrajzilag olyan terület, amely kiváló indikátorként is működhet: mind a melegedés, mind az ezzel járó további (felszín alatti) jégolvadás, a nedvesedés és a szárazodás is dinamikusan változtathatja környezeti viszonyait. Az Ojos del Saladóra vonatkoztatott megállapítások ugyanakkor kiterjeszthetőek: a Száraz-Andok hatalmas kiterjedésű területén alapvetően hasonló magashegyi sivatagi állapotok jellemzőek. Következtetéseinknek ezért regionális feltáró szerepe is van.

MÓDSZEREK, ESZKÖZÖK

A vizsgálatok alapozása terepbejárások, anyagvizsgálatok és űrfelvétel-elemzések során történt, ehhezfelhasználtuk az 1x1 méteres terepi felbontású, a GoogleEarth szerveréről elérhető űrfelvételeket (2007. 04. 29., 2008. 12. 16., 2012. 04. 17.). A felszín alatti hőmérsékletmérés HOB0 Pro v2 dataloggerekkel zajlik.

- 4200 m-en 10 és 35 cm mélyen
- 5260 m-en 10, 35 és 60 cm mélyen
- 5830 m-en 10, 35 és 60 cm mélyen
- 6750 m-en 10 és 17 cm mélyen
- 6893 m-en a felszínen és 10 cm mélyen(2. ábra).



2.ábra: A legfontosabb vizsgálati helyszínek az Ojos del Saladón

2014-ben 4600 méteren még egy állomást hoztunk létre (10 és 35 cm mélyen elhelyezett műszerekkel), valamint 5950 m-en, 2 m magasságban, árnyékolt helyen is elhelyeztünk adatgyűjtőt.

A mérési gyakoriság óránkénti, vagyis a két éves mérési periódusban egy műszerből mintegy 18 ezer adat származik. A hó-firn-jég elkülönítésre terepi precíziós mérleget és Eijkelkamp mintavevőket használtunk. A regolit porozitásának, vízszállításának megállapítására fémcső-mintákat vettünk.

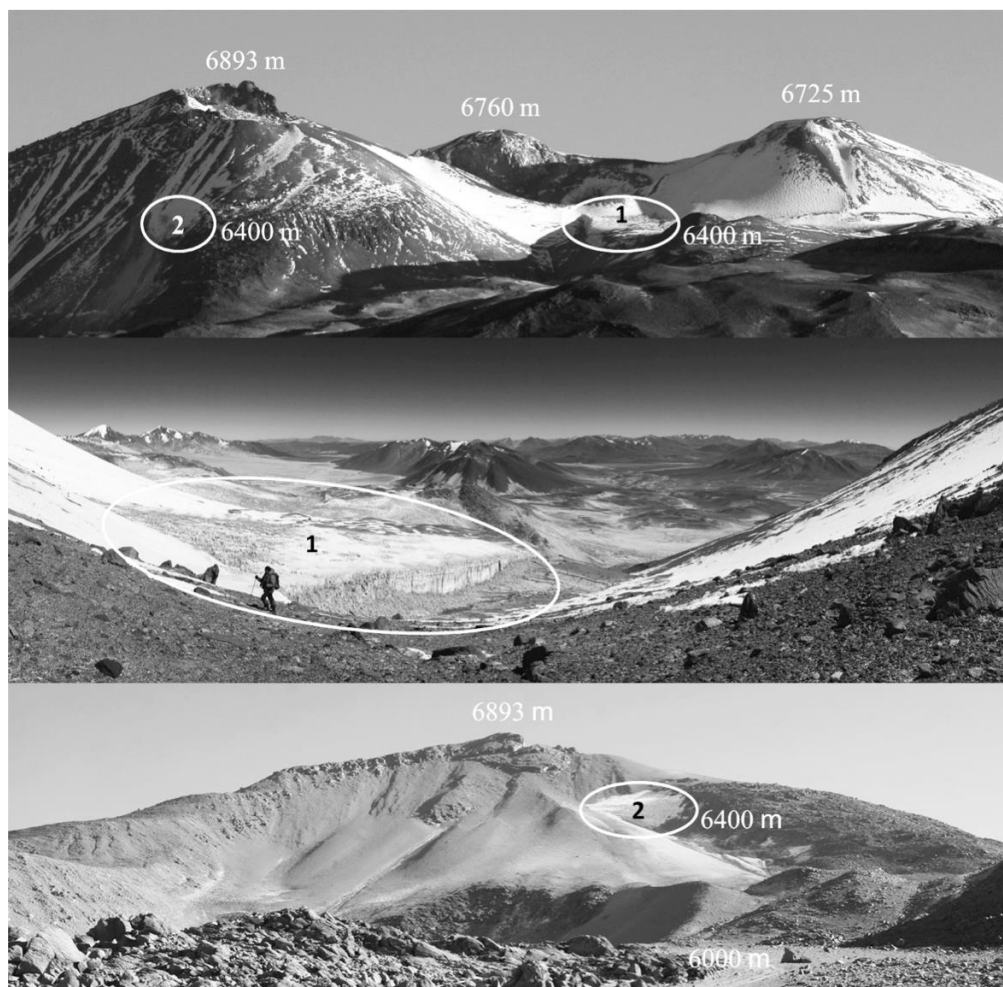
EREDMÉNYEK

A felszíni jég jelenléte

Gleccsermaradványok a felszínen

Az Ojos del Salado felszíni jégborítása napjainkra néhány kis kiterjedésű, 100-méteres nagyságrendű holtjégfoltra zsugorodott. E gleccsermaradványok 6400 méter körüli magasságban alkotnak nyelveket (3. ábra), maximális vastagságuk 10-15 m. Olvadásuk gyors, olvadékvizeik kis patakokat táplálnak. Több mint 600 méterrel fekszenek a becsült hóhatár alatt, felszínüket vékony (néhány dm-es firnréteg fedi).

Visszahúzóási sebességükről nincs adat, de mai fogyásukból néhány évtizedes további gleccserjelenlét prognosztizálható. Egyelőre tehát jelentős vízforrások, ám ez csak évtizedes távlatú vízbázist jelent.



3. ábra: Gleccsermaradványok I.
Olvadó, fedetlen holtjégtömegek 6400 m körül

Eltemetett gleccsermaradványok

A hegyen kialakult egykori gleccserek maradványjege törmelék alá temetve, lejtőtörmelékkel fedve és jégmagvú oldalmorénasáncok formájában (5000 és 6300 m között) a felszíni megjelenésénél nagyobb mértékben is jelen van ma még. A gleccserjég fogyását a száraz területen a törmelékkel való betemetődés – szigetelő jellegénél fogva – jelentősen késlelteti, ám napjainkban pont ezen eltemetett jég olvadása az egyik legdominánsabb folyamat.

Az olvadás akkor gyorsul fel, amikor az eltemetett jégtömb a felszínre kerül: ez akkor valósul meg, ha az olvadékvizek (melyek szerepe ma egyre nő a növekvő olvadás miatt) bevágódnak a völgytalpon, alámoszák a völgyoldalakat és a jeget fedő homok vagy épp horzsakő lecsúszik (4. ábra).

A holtjég-tömb olvadása megindulhat az elvékonyodó homokréteg alatt is, aminek az lesz a felszíni következménye, hogy a homok tömörödik, kerekded, sekély mélyedések, a fedett karsztok szuffóziós, utánsüllyedésszerű töbreihez hasonló alakzatok jönnek létre.

A völgyet kitöltő jég alatt utat találó olvadékvíz jégalapi alagutat olvaszt. Ezekben a jég alulról olvadva tágíthatja az üreget, felharapódzik a fedőanyagig. Ha nagyméretű üreg alakul ki, akkor a fedő moréna, horzsaköves homok beszakad és a felszínen lyuk képződik. Kialakul a lezökkenésszerű, utánsüllyedésszerű pszeudotöbör (Eberhard and Sharples 2013).



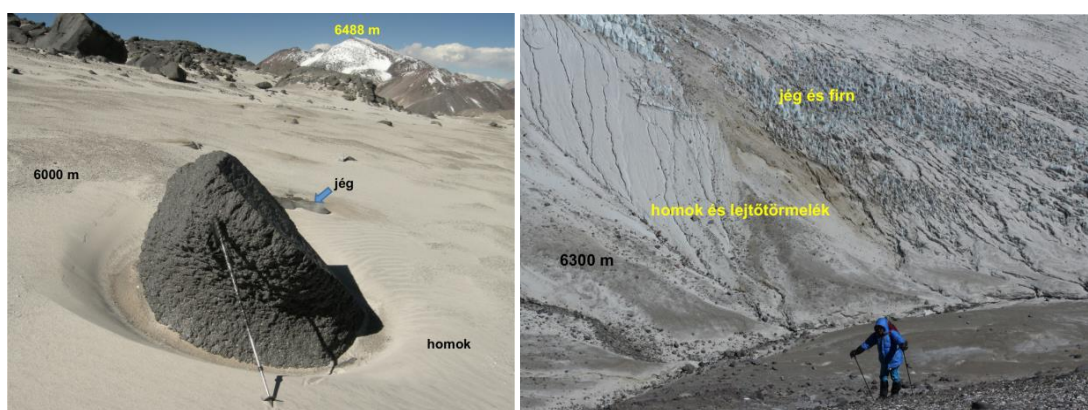
4. ábra: Gleccsrmaradványok II. Olvadó, fedett holtjégtömegek 5200 m körül

A: Egykori gleccservölgy oldalmorénái 5300 méteren, 1. kibukkanó holtjég

B: Lezökkenéses, utánsüllyedéses pszeudotöbör

C: 1. jég, 2. horzsakő és homokréteg, 3. olvadékvíz, 4. lezökkenésess pszeudotöbör

A lejtőtörmelékkel fedett hegyoldalakon 6000 méter fölött különösen jellemző, hogy az elvékonyodott gleccsrmaradványokra homok és horzsakőgazdag üledék települ. A szigetelőburok vékony, így ha nagy területű jeget fed az üledék, akkor az olvadásból származó erek felszabdalgják a felszínt, míg ha apró jégmaradványokat fed üledék, akkor nincs felszíni vízjelenlét, a nedvesség elszivárog (5. ábra).

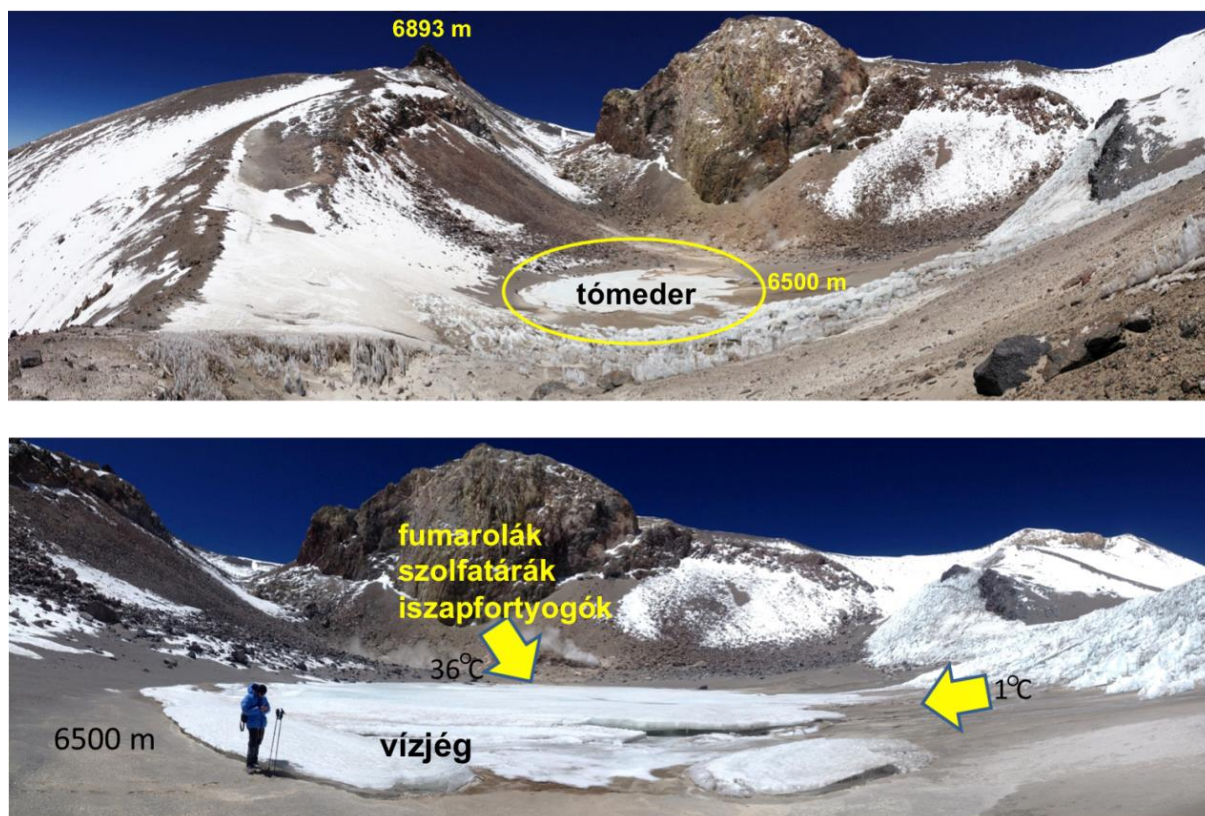


5. ábra: eltemetett jég kibukkanása a homokos-, horzsaköves lejtőüledék alól

Vízjég

A magashegyi tómedrek a vulkáni felszín zárt mélyedéseiben alakultak ki. Ha van víz bennük, akkor alattuk talik képződik, de összefüggő permafroszt esetén vizük nem tud a mélybe szivárogni. Ám kiszáradhatnak, vagy fenekükig is befagyhatnak. A főként olvadékvízből (permafroszt, hó és firn, gleccser) származó tó helyén ez utóbbi esetben vízjég-táblák maradnak

(6. ábra). A Föld legmagasabban fekvő tavával is ez a helyzet: többnyire elenyésző a nyílt víztükör mérete, ám a vízjéglepeny jól mutatja a tó időszakos kiterjedését (60-80 m átmérővel)



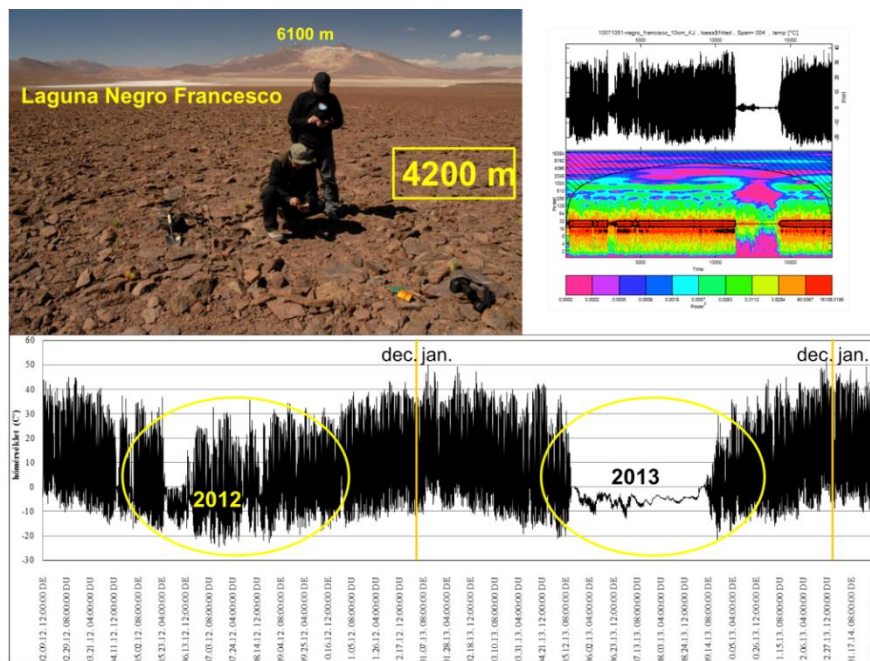
6. ábra: A Föld legmagasabban fekvő tómedencéje – vízjéggel kitöltve. Vízutánpótlás most is érkezik: olvadó firnből és hóból, valamint hőforrásokból

A felszín alatti jég

A felszíni és az eltemetett gleccserjég olvadásából származó víz mellett a permafroszt aktív rétegéből származó olvadékvíz is rendkívül jelentős. Mint hosszú távon jelen lévő vízbázis, ez jelenleg a legfontosabb.

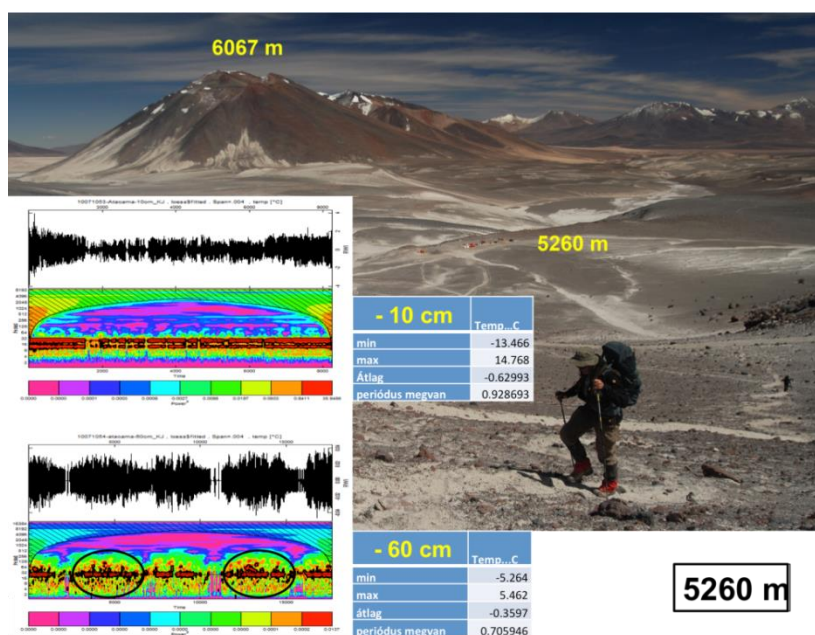
A permafroszt olvadása, a jéggel rendelkező övezet magasabbra tolódása akkor vizsgálható, ha adataink vannak az aktív réteg hőmérsékletjárásáról, ill. a H₂O halmazállapot-változásairól. A geomorfológiailag legjellegzetesebb, reprezentatív magassági szinteken elhelyezett mérőállomásaink ezt a célt szolgálják.

4200 m: Az igen erős hőingás és rendkívüli fagyváltozékonyság okozta aprózódás mindent betemető törmelékképződéshez vezet. A 4200 méteres adatgyűjtő helyünkön az egyik műszer két éven keresztül kőszivatag-felszíni hőmérsékletet mért – közvetlen besugárzás alatt (7. ábra). Ebből megállapítható, hogy hóborítás nélkül kb. 330-340 nap fagyváltozékonnyá válik a felszínen! A szélsőséges napi ingás eltűnése jelezte hóborítás viszont szélsőségesen alakul, mivel az első évben összesen mintegy 3-4 heti volt, míg a második évben összidőtartama elérte a 4 hónapot, a napi hőingás-érték pedig az 50 °C-t is meghaladta (télen is, amikor nappal akár 30 °C fölé melegedett a felszín, majd éjszaka -20 °C-ig is hűlhetett).



7. ábra: Felszíni hőmérsékletváltozás (2012.02.09 – 2014.02.07) 4200 m-en.
A sárga körök a téli időszakot mutatják. A jobb felső ábrán a napi hőmérsékletjárás periodicitásának megléte, ill. időszakos, téli hiánya látszik

5260 m: Az aktív réteg vastagsága nagyobb, mint 60 cm, a felső centimétereken folyamatos a hóingás, a száraz üledék miatt halmazállapotváltozás okozta hóingás-kimaradás alig tapasztalható. -60 cm-en ez csak a tavaszi-őszi átmeneti időszakokban fordul elő rövid időtartamban (8. ábra). Az aktív réteg max. fél éves időtartamban fagyott, az évi középhőmérséklet $-0,36 - -0,63\text{ }^{\circ}\text{C}$, ami a szaggatott örökfagyra utal. Az olvadás gyorsan eléri a nagyobb mélységeket, a felső fél méter gyors ütemű kiszáradását vonva maga után (e kiszáradó és fél évig felengedő felszíni-felszínközeli anyag kedvez az eolikus üledékmozgatásnak).



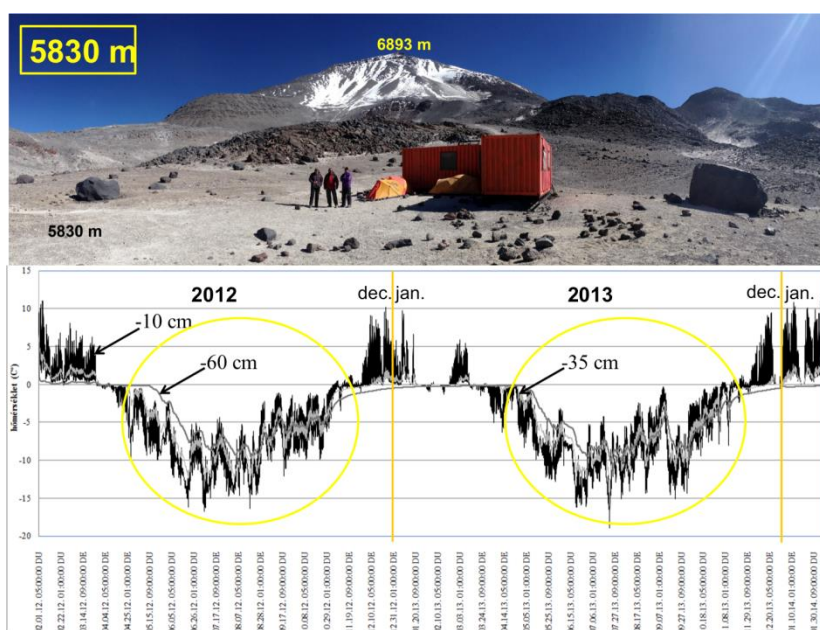
8. ábra: A felszín alatti hőmérsékletjárás 5260 méter magasan.
A -10cm-en lévő műszer adatai egy évre vonatkoznak,
a -60 cm-en mérő két évre, karikázva a téli időszakok

5830 m: Az aktív réteg hőmérsékletjárásán keresztül a fagyás-olvadás ciklusai szembetűnőek, ami legfőképp a halmazállapotváltozások időszakainak meghatározása és az aktív réteg megvastagodásának nyomon követése szempontjából lényeges.

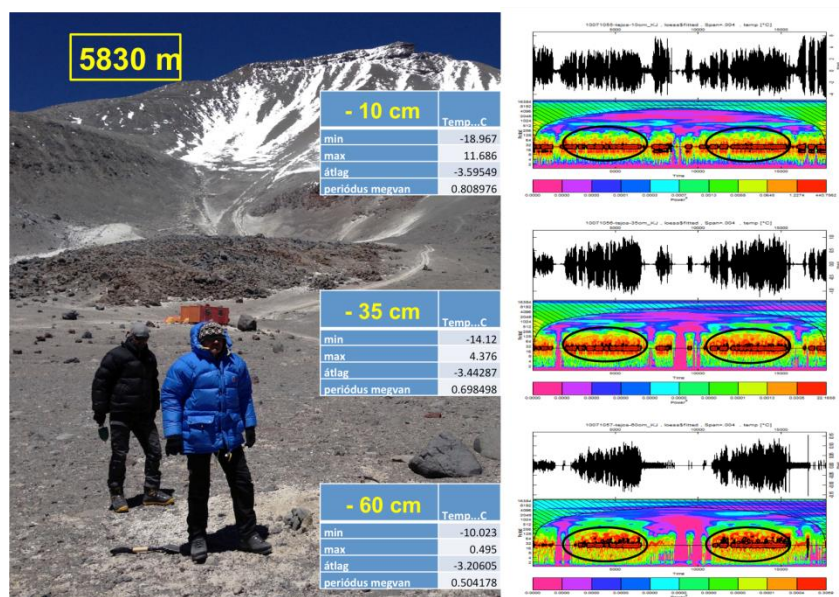
A 60 cm-es mélységig megvastagodó aktív réteg fagyási-olvadási ciklusairól itt is a napi periodicitás-elemzés nyújt képet. A periódusok eltűnése a nagy energiát felemészítő halmazállapot-változások sajátossága. Míg a téli időszakokban a teljesen átfagyó aljzatban végig tapasztalható a napi hőmérsékleti ciklikusság, az olvadási időszakban mindez többször is megszakad (9-10. ábra), részben a rövid periódusú nyári havazás-hóborítás, részben a ritkább felszíni újrafagyás miatt.

A felszínközeli centiméterek nyári újrafagyása – az alacsony külső hőmérsékletek miatt – ismétlődő jelenség. Ugyanakkor az aktív réteg alsó része felé haladva – a magasabb nedvességtartalom miatt – még gyakrabban történik halmazállapot változás, 60 cm mélyen gyakorlatilag a nyári szezonban a víz-jég határán váltakozik a közetszemcsék közötti nedvességtartalom. Az aktív réteg ebben a magasságban 8 hónapon át (áprilistól decemberig) fagyott állapotú, évi középhőmérséklete – mélységtől függően – $-3,2$ – $-3,5$ °C. Az olvadási időszakot 4-5 igen hideg szakasz tagolja, ekkor a felső rétegek időleges újrafagyása is megindul. Huzamosabb, vastagabb nyári hótakaró jelenlétére nem utalnak az adatok.

E szintnek – a cementjég viszonylag hosszú, ám elnyúló olvadási szakasza és jelentős felolvadási mélysége miatt – alapvető a szerepe az alacsonyabb szintek vízellátásában: a legfontosabb, hosszú távú felszín alatti vízforrás övezetének tekinthető.



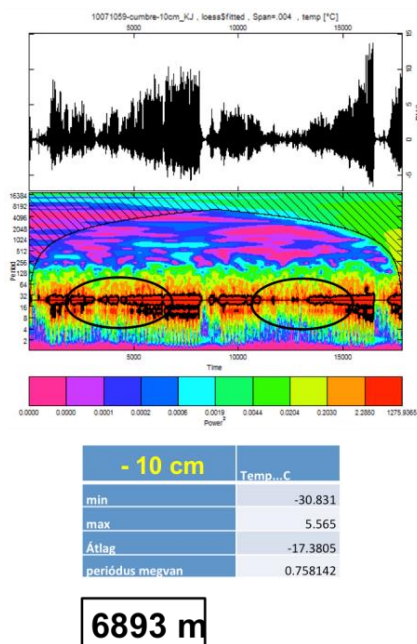
9. ábra: Az 5830 méteren létesített állomás aktív rétegében (10, 35 és 60 cm mélyen) mért hőmérsékletek (2012.02.01 – 2014.02.14), sárgával karikázva a téli időszakok



10. ábra: Az 5830 m-en fekvő állomás aktív rétegében (10, 35 és 60 cm mélyen) mért hőmérsékletjárás periodicitása (a periodicitás meglétét minden mélységnél az alsó diagramrészek központi, vastag piros sávja jelzi)

6893 m: Az Ojos del Salado csúcsán a 10 cm-nyi vastagságú törmelékben mért évi középhőmérséklet (10 cm-rel a felszín alatt) $-17,4^{\circ}\text{C}$ és a vizsgált 730 napból mindössze 18 napon fordult elő kevéssel fagypont fölötti hőmérséklet, 97 napon azonban -25°C alá ment a regolit hőmérséklete. A szinte folyamatosan fagyott közettörmelék ugyanakkor többnyire száraz, így laza, morzsolódó állagú.

A mérési adatok az alsóbb szintekkel szemben azt mutatják, hogy itt a téli időszakban marad el a napi hőmérsékleti ciklikusság (11. ábra). Ez a tetőn ekkor kialakuló fagyott hóborítás szigetelő hatásával magyarázható.



11. ábra: Az Ojos del Salado csúcsán, a kötött törmelékben mért hőmérséklet periodicitása, bekarikázva a téli időszakok

KÖVETKEZTETÉSEK

6000 m-en még sivatagi táj („hiperarid periglaciális”) az uralkodó.

A kősvatagos környezet uralkodó felszínformáló folyamata – az aprózódás mellett – a szélmarás és a maradéktakaró-képződés. Bár permafroszt aljzatú a terület, az eolikus folyamatok felülírják a felszíni periglaciális jelenségeket.

Periglaciális tömegmozgások hiánya.

Az aktív réteg kiszáradó felszínközeli része miatt a fagyváltozékonysághoz és a fagyemeléshöz kötődő periglaciális lejtős tömegmozgások jelenléte alárendelt.

5800-6400 m: a fő olvadékvízellátó övezet.

Az olvadékvíz legfontosabb forrásterülete ez a magassági övezet. A felszíni és az eltemetett jég mai erőteljes degradációja miatt az olvadékvíz mennyiségének növekedése figyelhető meg. E jégolvadás rövid távon növeli a felszíni és felszín alatti vízáramlás mennyiségét, néhány évtizedes távlatban azonban e jégtípusok elfogyása várható, ami drasztikus vízmennyiség-csökkenéshez vezet.

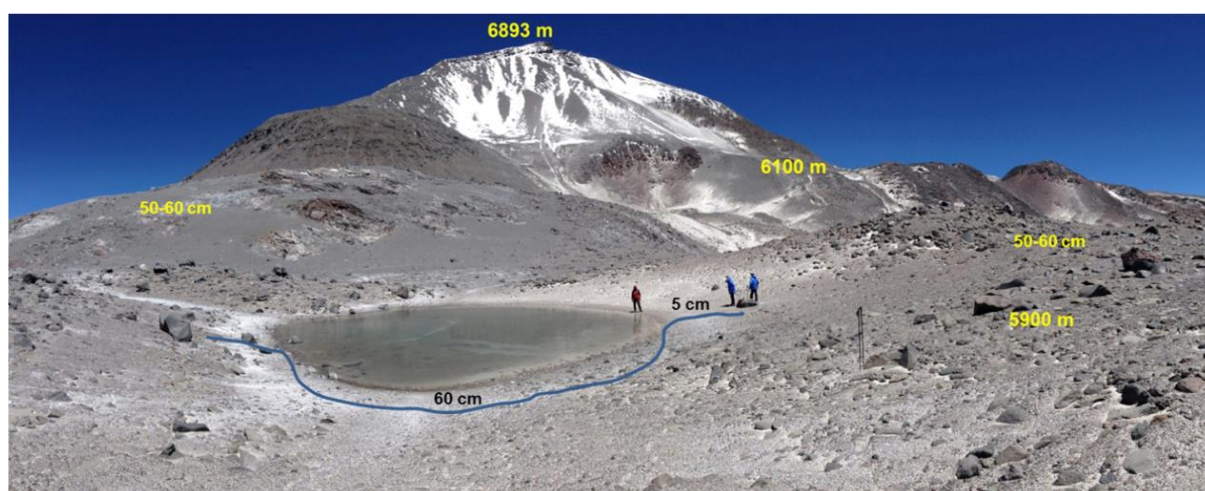
Az itt jelenlévő hegyi permafroszt aktív rétegének felengedése elnyújtott folyamat, a jégcement olvadása egész nyáron szivárgó nedvességgel táplálja a lejtők felengedő regolitrétegének alját.

A besugárzás növekedésével, a felszín erőteljesebb felmelegedésével az aktív réteg további vastagodása, hosszabb távon pedig a permafroszt degradációja következik be. Ez nyaranta egyelőre növekvő lefolyást okoz, de a permafroszt felszakadozásával, az övezet magasabbra szorulásával és zsugorodásával néhány évtizedes távlatban ebben a tekintetben is szárazodás várható.

Permafrosztból táplálkozó tavak.

A fő vízáadó szintben az aktív réteg megvastagodása jellemzően 50-60 cm-es mélységig terjed. Az összegyűlő és az üledéket átmedvesítő víz miatt azonban a medencealjkon az aktív réteg csak néhány cm vastag. A szivárgó olvadékvízaz elgátolt medencékben tavakat hozhat létre (12. ábra).

Az erős besugárzás hatására e sekély (1 méternél ritkán mélyebb) állóvizek nyáron akár 9 °C-ra felmelegednek, miközben a levegő nappali hőmérséklete árnyékban itt ugyanekkor fagypont közeli. A tavak hőátadása csökkenti alattuk a permafroszt mennyiségét, jelentős méretű talikokat létrehozva.



12. ábra: Permafroszt eredetű olvadékvízből táplálkozó tó 5900 méteren az aktív réteg maximális nyári vastagságával

FELHASZNÁLT IRODALOM

- BRIDGES, N.T., DE SILVA, S.L., ZIMBELMAN, J.R., LORENZ R.D. 2012. Formation conditions for coarse-grained megaripples on Earth and Mars: lessons from the Argentinian Puna and wind tunnel experiments - Third International Planetary Dunes Workshop
- CLAPPERTON C.M. 1994. The Quaternary glaciation of Chile – *Revista Chilena de Historia Natural*, 67:369-383
- DE SILVA, S.L. 2010. Largest wind ripples on Earth? Comment – *Geology*, 38. 218.
- EBERHARD, R., SHARPLES, C. 2013. Appropriate terminology for karst-like phenomena: the problem with ‘pseudokarst’ – *International Journal of Speleology* 42. (2) 109-113.
- GSPURNING, J., LAZER, R., SULZER, W. 2006. Regional climate and snow/glacier distribution in Southern Upper Atacama (Ojos del Salado) – an integrated statistical, GIS and RS based approach – *Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung*, 41. 59-70.
- KARÁTSÓN, D., TELBISZ, T., WÖRNER, G. 2011. Erosion rates and erosion patterns of neogene to Quaternary stratovolcanoes in the Western Cordillera of the Central Andes: an SRTM DEM based analysis – *Geology*, doi:10.1016/j.geomorph.2011.10.010
- MESSERLI, B., GROSJEAN, M., MATHIAS VUILLE, M. 1997. Water availability, protected areas, and natural resources in the Andean desert Altiplano – *Mountain Research and Development*, vol. 17, No.3, 229-238
- MILANA, J.P. 2009. Largest wind ripples on Earth? – *Geology*, 37. 343-346.
- MILANA, J.P., FORMAN, S. AND KRÖHLING, D. 2010. Largest wind ripples on Earth? Reply – *Geology*, 38. 219-220.
- MORENO, T., GIBBONS, W. 2007. *The Geology of Chile* – Geological Society of London, 414.
- KAUFMANN, V., KLOSTIUS, W., BENZINGER, R. 1995. Topographic mapping of the Volcano Nevado Ojos del Salado using optical and microwave image data. - *Proceedings of the 3rd International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography*, Mendoza, Argentina, 47-59.
- THOMAS, D. S. G. 2011. *Arid Zone Geomorphology: Process, Form and Change in Drylands* – John Wiley & Sons, 648